
ノイズフィルタ用高透磁率鉄粉「KIP MG270H」の磁気特性

Magnetic Properties of High Permeability Iron Powder“KIP MG270H” for Line Filter Cores

尾崎 由紀子(Yukiko Ozaki) 藤長 政志(Masashi Fujinaga)

要旨：

還元鉄粉を使用した圧粉磁心の初透磁率におよぼす粉体特性、不純物濃度、成形後の結晶粒径および成形時に導入される歪みの影響を解明した。その結果、(1) 不純物 (O, C, P, S) の濃度を低減し、見かけ密度を増大させることによって圧粉密度を増大させる、(2) 圧粉体中の α -Fe 結晶粒径の微細化を抑制することによって初透磁率の改善が可能であることが判明した。結晶粒径の影響を詳しく調査するために、鉄粉の粒界近傍の微視構造を透過電子顕微鏡で観察した。その結果、粒界に沿って磁壁の厚さと同程度の大きさの酸化物の析出が確認された。このことは、圧粉磁芯中の結晶粒界が、塑性変形に伴う転位の集積の場であると同時に非磁性酸化物の析出の場となっており、磁壁移動を阻害するピンングサイトとして機能していることを示唆している。上述の知見をもとに開発された還元鉄粉「KIP MG270H」は、従来の磁性材用還元鉄粉に比べて初透磁率が高く、その周波数依存性は数百 kHz まではフラットであり、ノイズフィルタ用鉄粉として最適である。

Synopsis：

The initial permeability of reduced iron powder cores has been investigated in relation to the effects of material characteristics dependence, impurity concentration, grain size and residual strain introduced during the compacting process. The reduction of impurities (O, C, P and S) and coarsening of grains have been found effective for improving the permeability. Transmission electron microscope observation around the grain boundaries of an iron particle revealed that oxide precipitates are formed along the grain boundaries with sizes comparable to the domain wall thickness of pure iron. This fact suggests that the grain boundaries act as the sites of strong pinning of the domain wall displacement. On the basis of these findings, Kawasaki Steel has developed a new reduced iron powder "KIP MG270H", realizing permeabilities higher than the conventional materials up to several hundreds Hertz. This material is applicable to line noise filter cores.

本文は次のページから閲覧できます。

ノイズフィルタ用高透磁率鉄粉「KIP MG270H」の磁気特性*

川崎製鉄技報
31 (1999) 2, 130-134

Magnetic Properties of High Permeability Iron Powder “KIP MG270H” for Line Filter Cores



尾崎 由紀子
Yukiko Ozaki
技術研究所 溶接・鉄粉研究部門鉄粉研究グループ 主任研究員 (課長補)・理博



藤長 政志
Masashi Fujinaga
千葉製鉄所 鉄粉・溶材部 鉄粉・溶材技術室 主査(課長)

要旨

還元鉄粉を使用した圧粉磁心の初透磁率におよぼす粉体特性、不純物濃度、成形後の結晶粒径および成形時に導入される歪みの影響を解明した。その結果、(1) 不純物 (O, C, P, S) の濃度を低減し、見かけ密度を増大させることによって圧粉密度を増大させる、(2) 圧粉体中の α -Fe 結晶粒径の微細化を抑制することによって初透磁率の改善が可能であることが判明した。結晶粒径の影響を詳しく調査するために、鉄粉の粒界近傍の微視構造を透過電子顕微鏡で観察した。その結果、粒界に沿って磁壁の厚さと同程度の大きさの酸化物の析出が確認された。このことは、圧粉磁芯中の結晶粒界が、塑性変形に伴う転位の集積の場であると同時に非磁性酸化物の析出の場となっており、磁壁移動を阻害するピンニングサイトとして機能していることを示唆している。上述の知見をもとに開発された還元鉄粉「KIP MG270H」は、従来の磁性材用還元鉄粉に比べて初透磁率が高く、その周波数依存性は数百 kHz まではフラットであり、ノイズフィルタ用鉄粉として最適である。

Synopsis:

The initial permeability of reduced iron powder cores has been investigated in relation to the effects of material characteristics dependence, impurity concentration, grain size and residual strain introduced during the compacting process. The reduction of impurities (O, C, P and S) and coarsening of grains have been found effective for improving the permeability. Transmission electron microscope observation around the grain boundaries of an iron particle revealed that oxide precipitates are formed along the grain boundaries with sizes comparable to the domain wall thickness of pure iron. This fact suggests that the grain boundaries act as the sites of strong pinning of the domain wall displacement. On the basis of these findings, Kawasaki Steel has developed a new reduced iron powder “KIP MG270H”, realizing permeabilities higher than the conventional materials up to several hundreds Hertz. This material is applicable to line noise filter cores.

1 緒 言

高調波障害・電磁障害に対する規制強化にともない、各種電子機器の電源部周辺のノイズの除去を目的としたノイズフィルタの使用量が伸びている。高周波用途ではフェライト焼結体コアが、中低周波数帯域で直流重畳特性の要求される用途には飽和磁束密度の高い鉄系合金粉末の圧粉磁芯が用いられる。純鉄粉を原料としたダストコアは、良質なノイズフィルタとして実績があり、合金系圧粉磁芯の中では最も生産量が多い。

純鉄系のダストコアとしては、電解鉄粉と還元鉄粉が多く用いら

れる。電解鉄粉は、透磁率が比較的高いが、製造コストが高いという問題がある。還元鉄粉は、電解鉄粉に比較すると、安価であるが、透磁率が低く、利用分野が限定されていた。

鉄粉の磁気特性に関する研究は、電磁クラッチなどに使用されるアトマイズ鉄粉を中心に行われ、粒子サイズ・圧縮性と磁束密度の関係^{1,2)}、鉄粉の形状・不純物濃度・金属組織と磁束密度あるいは鉄損の関係³⁻⁵⁾などの報告がある。しかしながら、還元鉄粉を対象とした研究はきわめて少ない。本研究では、透磁率の改善とそのバラツキの低減を目的として、還元鉄粉の粉体特性・不純物濃度・介在物・圧粉体中の金属組織、および成形時に導入される歪みと、圧粉磁心の初透磁率との関係を解析した。本報告では、この解析の結果と、解析によって得られた知見をもとに開発した高透磁率還元鉄粉 KIP MG270H の磁気特性を報告する。

* 平成 11 年 2 月 18 日原稿受付

2 圧粉磁芯の初透磁率改善の考え方

2.1 圧粉磁芯の磁気特性の表現

強磁性体金属粉末を原料とする磁芯には、潤滑剤およびバインダーを混合したのち、加圧成形したままの形態で使用される圧粉磁芯と、加圧成形の後焼結過程を経て使用される焼結磁芯とがある。前者は、後者に比べて比較的高い周波数帯域で使用され、その用途の中心は、電子機器の電源周辺のノイズを吸収する目的で設置されるノイズフィルタである。

圧粉磁芯の磁気特性は、主として交流の低磁界下で測定される複素初透磁率 (μ_1'/μ_0 , μ_1''/μ_0) または初透磁率 $\mu_1/\mu_0 = (\mu_1'^2 + \mu_1''^2)^{1/2}/\mu_0$ と、単位体積当たりの鉄損 $P_{cv} = \pi f H_m^2 \mu_1''$ によって評価される。ここで、 f は測定周波数、 H_m は最大印加磁界強度、 μ_0 は真空の透磁率を表す。初透磁率の値は、過電流の影響が無視できる十分低い周波数領域での初透磁率を直流初透磁率 $\mu_{1,dc}/\mu_0$ として解析に用いられていることが多い。Ollendorf によれば、ローレンツの考えを適用することによって、 $\mu_{1,dc}/\mu_0$ は、磁性体の充填率 η 、粒子の反磁界係数 N 、粒子の材質によって決定される固有の透磁率 μ_i の関数として次式で表わされる⁹⁾。

$$\mu_{1,dc}/\mu_0 = \eta(\mu_i - \mu_0)/\{N(1 - \eta)(\mu_i - \mu_0) + \mu_0\} \dots \dots (1)$$

この関数式によれば、 $\mu_{1,dc}/\mu_0$ は、単位体積中の磁性体の密度（粒子の集合体としての性質）、粒子形状に依存した反磁界係数（粒子の外観に依存した性質）および粒子の材質の透磁率（粒子の内部構造に依存した性質）によって決定されることが分かり、これらの支配因子は、圧粉磁芯の初透磁率の高低を理解する上で重要である。

2.2 圧粉磁芯の初透磁率の支配因子

圧粉磁芯の磁気特性の改善のためには、磁気特性と、材料の基本的物性との関係を理論的モデルに基づいて定量的に関係づけることが重要である。さきに、高城らは、Ollendorf の関係と渦電流モデルに基づく理論解析によって、粉体および圧粉体の諸物性と初透磁率および鉄損の関係を定量的に説明することに成功し、この結果は圧粉磁芯の材料設計に有効な指針となっている^{7,8)}。この解析において考慮されている粉体個々の物性は、粒子の形状・粒径、および表面の酸化状態であり、いわば粒子を外部から見た性質である。しかしながら、(1) 式から明らかなように、初透磁率においては、材質の透磁率 μ_i が重要な因子の一つであり、鉄粉製造時および圧粉体成形時に導入される歪み・結晶粒界・析出物・第 2 相の存在など、

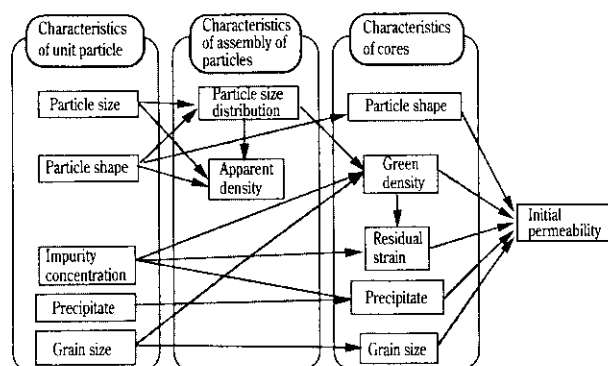


Fig. 1 Mechanisms of controlling the initial permeability of iron powder cores

磁壁の移動を支配する粒子の内部構造を考慮した検討が必要である。このような観点から、本研究では高城が整理した材料特性と磁気特性との相関図をもとに⁷⁾、材料物性の項目として粒子の内部構造にかかわる因子として、不純物、結晶粒径、および加圧成形過程で導入される歪みを加えて Fig. 1 に示す相関図を作成し、初透磁率とこれらの因子との関係を改めて整理することとした。

3 圧粉磁芯の初透磁率支配要因の解析

3.1 実験方法

3.1.1 使用原料

試料として、たがいに粉体特性の異なる還元鉄粉を用意した。Table 1 にこれらの鉄粉の見かけ密度、および圧粉密度（成形圧力 490 MPa）、化学組成を示す。

3.1.2 試験片の作製

鉄粉に 1 mass% のステアリン酸亜鉛（日本油脂（株）製）を混合し、成形圧力 490 MPa で直方体およびリング形状に成形した。

直方体試験片（長さ 35 mm、幅 10 mm、高さ 5 mm）は、圧粉体中の粒子の組織観察および X 線回折測定に、リング形状試験片（外径 38 mm、内径 25 mm、高さ 6.2 mm）は、複素初透磁率の測定に用いた。

3.1.3 測定

複素初透磁率は、リング形状の圧粉磁芯に $\phi 0.6$ mm のホルマル線を 11 回均一に巻線し、インピーダンスメーター（日本ヒューレット・パッカード（株）製 4824A）を用いて、周波数 10 kHz ~ 1 MHz の範囲で複素インピーダンスを測定し、複素初透磁率に換算した。初透磁率の値は、10 kHz での値 $\mu_{i,10k}/\mu_0$ で代表させた。

圧粉磁芯中の内部応力は、加圧方向に平行な直方体が定の側面で X 線回折測定を行い、 α -Fe (200) 回折線の積分幅をもとに議論する。

3.2 実験結果

3.2.1 初透磁率と圧粉体の積分幅

各試料の $\mu_{i,10k}/\mu_0$ と、圧粉体の α -Fe (200) 回折線の積分幅 β を Table 2 に示す。Fig. 2 および 3 は、Fig. 1 の相関図をもとに集合体としての、それぞれ、圧粉密度および β と、 $\mu_{i,10k}/\mu_0$ との関係をまとめたものである。Fig. 2 より、圧粉密度（したがって充填率 η ）が高いほど $\mu_{i,10k}/\mu_0$ が高く、(1) 式を支持する結果となった。また、

Table 1 Characteristics of iron powders

Sample	Apparent density (Mg/m ³)	Chemical composition (mass%)				Green density* (Mg/m ³)
		O	C	P	S	
A	2.67	0.291	0.003	0.010	0.014	6.76
B	2.62	0.288	0.002	0.008	0.011	6.78
C	2.65	0.316	0.004	0.008	0.009	6.76
D	2.67	0.310	0.002	0.005	0.015	6.80
E	2.69	0.303	0.002	0.006	0.011	6.82
F	2.68	0.310	0.002	0.012	0.011	6.78
G	2.67	0.309	0.003	0.007	0.012	6.80
H	2.65	0.296	0.001	0.006	0.013	6.80
I	2.74	0.334	0.001	0.006	0.012	6.86
G	2.66	0.320	0.004	0.006	0.013	6.87
K	2.68	0.252	0.001	0.011	0.003	6.80
L	2.67	0.356	0.001	0.009	0.003	6.83

*Compacting pressure: 490 MPa

Table 2 Initial permeability at 10 kHz and integrated width of iron powder compactions

Sample	Initial permeability $\mu_{i,10k}/\mu_0$	Integrated width ($^\circ$)
A	69.0	0.349
B	69.7	0.349
C	70.3	0.358
D	70.7	0.350
E	71.1	0.353
F	72.1	0.354
G	72.3	0.371
H	72.3	0.365
I	73.0	0.364
J	73.2	0.346
K	74.8	0.338
L	77.7	0.350

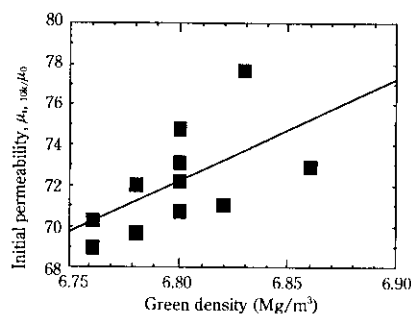


Fig. 2 Relation between green density and initial permeability at 10 kHz of iron powder cores

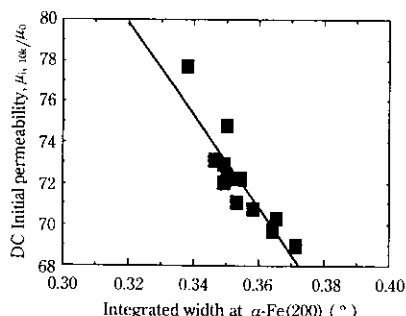


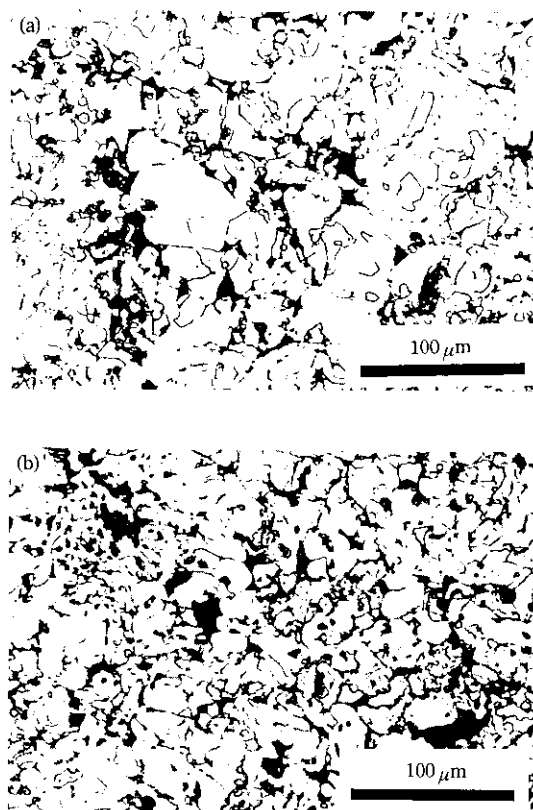
Fig. 3 Relation between integrated width on the surface of compacted body parallel to the compaction pressure and initial permeability at 10 kHz of iron powder cores

Fig. 3 に示すように、横軸 β が小さいほど $\mu_{i,10k}/\mu_0$ が高いことが新たに発見された。

3.2.2 圧粉密度の支配因子

$\mu_{i,10k}/\mu_0$ と正の相関を示す圧粉密度 ρ は、鉄粉の圧密化挙動の解析から、粒子の表面形状と材質の硬さに依存する⁹⁾。そこで、Table 1 の値をもとに、 ρ と粉体の形状を反映する見かけ密度 ρ_A (Mg/m³) および不純物 O, C, P, S の濃度 x_O, x_C, x_P, x_S (mass%) の関係を重回帰によって求めると、次式となる。

$$\rho = 0.470 \rho_A - 0.147 x_O - 18.6 x_C - 11.2 x_P - 5.03 x_S, \\ R^2 = 0.916 \dots \dots \dots (2)$$

Photo 1 Optical micrographs of cross-section of reduced iron powder cores with $\mu_{i,10k}$: 75.9(a) and 70.8(b)

(2) 式より、 ρ_A が高く、不純物濃度が低いほど ρ が高いことが分かる。 ρ_A が低い粉体は、概して表面の凹凸が著しいため、粉体相互の摩擦抵抗が大きく、加圧成形過程における粒子再配列による緻密化が進行しにくいものと考えられる。また不純物元素、特に固溶型元素である C, P, S の濃度が高い粉体は固溶硬化によって、さらに C が高濃度の場合、炭化物の析出による析出強化によって塑性変形しにくいいため圧密化しにくいものと解釈される。

3.2.3 β の支配因子

Fig. 3 で明らかなように、 $\mu_{i,10k}/\mu_0$ と強い負の相関がある β は、加工を施された金属の場合、次式によって結晶粒径 ε_0 と歪み ζ とに関係づけられている¹⁰⁾。

$$\beta \cos \theta / \lambda = 1 / \varepsilon_0 + 2 \zeta \sin \theta / \lambda \dots \dots \dots (3)$$

ここで、 θ は X 線の回折角、 λ は X 線の波長を示す。(3) 式より、結晶粒径が大きく、歪みが小さいほど β が小さくなる。したがって、Fig. 3 の結果は、結晶粒径が大きく、歪みが小さい鉄粉を用いたコアほど $\mu_{i,10k}/\mu_0$ が高くなるものと解釈される。歪みは、磁壁移動の際の障壁となることが知られており¹¹⁾、この結果と一致する。結晶粒径と $\mu_{i,10k}/\mu_0$ の関係については、さらに以下の組織観察を行い、検討を加えた。

Photo 1(a) および (b) は、それぞれ $\mu_{i,10k}/\mu_0 = 75.9$ および 70.8 の圧粉体の圧縮方向に平行な断面の光学顕微鏡写真である。

結晶粒径と $\mu_{i,10k}/\mu_0$ の関係を検証するため、Photo 1(a) および (b) を画像解析し、結晶粒径の分布 (累積重量分率) としてまとめたものが Fig. 4 である。Fig. 4 より明らかなように、 $\mu_{i,10k}/\mu_0$ の高いコア中の鉄粉の結晶粒径は $\mu_{i,10k}/\mu_0$ の低いコア中の鉄粉の結晶粒径よりも大きい。結晶粒界は、結晶構造の不連続面であるとともに、

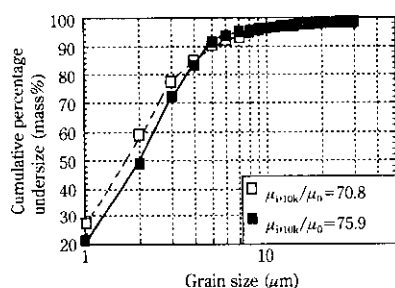
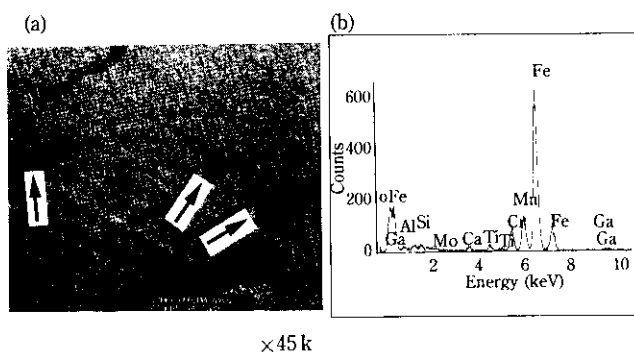
Fig. 4 Grain size distributions of α -Fe in iron powder cores

Fig. 5 TEM image around the grain boundary of the reduced iron powder (a) and EDX spectrum for the precipitate on the grain boundary observed in the TEM image (b)

塑性変形にともなう転位の集積の場となって内部応力が集中すると考えられている。このような結晶構造の不連続や内部応力の分布は、磁壁エネルギーの極値を形成するため、磁壁は動きにくくなる。したがって、形成過程において鉄粉が塑性変形した圧粉磁芯中の結晶粒界は、磁界の移動の障壁として機能すると考えられる。

結晶粒界は、介在物の析出の場でもある。Fig. 5(a) は、還元鉄粉一粒子を集束イオンビーム (FIB) によって薄膜化して観察した還元鉄粉の結晶粒界付近の透過電圧顕微鏡 (TEM) 像である。結晶粒界の幅は十数nm オーダーで、粒界に沿って直径 40-50 nm の介在物 (Fig. 5(a) 中の矢印) が確認されているほかには、第二相の存在は認められなかった。Fig. 5(b) は、介在物のエネルギー分散型 X 線 (EDX) のスペクトルである。検出された Fe, O, Mn, Cr, Si, Ca, Ti, Al, Mo, Ga のうち、Ga は FIB の線源に由来すると考えられ、粒界の介在物は、Fe, Mn, Cr, Si, Ca, Ti, Al, Mo を含む酸化物と見なされる。これらの構成元素の大部分は、各種鉄鋼材料の構成元素であり、いずれも還元鉄粉の原料であるミルスケール由来の不純物と考えられる。したがって、観測された介在物は、ミルスケールの還元工程で結晶粒界に残留したものと考えられる。純鉄の磁壁の厚さは、約 42 nm と計算されており¹²⁾、粒界の介在物のサイズと同程度であった。非磁性介在物が存在すると、磁壁の面積が減少して磁壁エネルギーが減少するほか、介在物表面に生じる磁極により形成される反磁界のために、静磁エネルギーが減少し、介在物近傍で磁性材の総エネルギーが極小値をとって、磁壁移動を阻害する。介在物の量が一定ならば、磁壁の厚さと同程度の大きさで介在物が分布する場合、総エネルギーの減少量が最大となって、介在物は強力なピンニングサイトとして機能すると考えられている¹³⁾。したがって、還元鉄粉で作製した圧粉磁芯中の結晶粒界は、応力集中の場となるだけでなく、磁壁の厚さと同程度のサイズの非磁性の介在物の析出の場となっており、磁壁のピンニングサイトとなっているものと考えられ

Table 3 Typical values of characteristics of iron powders

	MG270H	270MS
Chemical composition (mass%)		
Total Fe	99.4	99.4
Total C	0.001	0.003
Si	0.03	0.03
Mn	0.24	0.24
P	0.010	0.013
S	0.003	0.005
Apparent density (Mg/m ³)	2.70	2.66
Particle size distribution (mass%)		
+ 48 mesh	n.d.	n.d.
+ 100 mesh	1.2	1.9
+ 150 mesh	21.0	22.5
+ 200 mesh	33.8	32.0
+ 250 mesh	11.0	10.0
+ 325 mesh	18.7	18.2
- 325 mesh	14.3	16.0
Green density (Mg/m ³)	6.84	6.80
Initial permeability	76	71

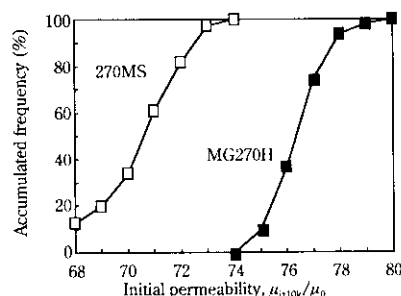


Fig. 6 Accumulated frequency of initial permeability of iron powder cores

る。

以上の結果から、結晶粒径が大きい鉄粉では、磁壁移動を阻害する結晶粒界および粒界近傍の介在物の数が相対的に少ないため、ピンニングサイトの密度が低くなり、磁壁移動が容易となって初透磁率が増大するものと解釈される。

4 高透磁率還元鉄粉 KIP MG270H の特徴

4.1 初透磁率

本研究より得られた知見をもとに、不純物 O, C, P, S の濃度の低減、圧縮性の改善、結晶粒径の粗大化を行うことによって、ノイズフィルタ用高透磁率還元鉄粉 KIP MG270H が開発された。Table 3 に KIP MG270H と磁性用従来材に KIP MG270MS の諸特性の代表値を、Fig. 6 に向製品の約 60 ロットの工程品の μ_{v10k}/μ_0 の値の累積頻度百分率をそれぞれ示す。KIP MG270H は、従来材に比較して不純物元素濃度が低く、見かけ密度および圧粉密度が高く、これらの結果として μ_{v10k}/μ_0 が改善されている。さらに、Fig. 6 より明らかなように、 μ_{v10k}/μ_0 のバラツキも半減し、高特性の製品となっている。

4.2 鉄損

本研究の目的は、還元鉄粉の初透磁率改善であるが、参考のため

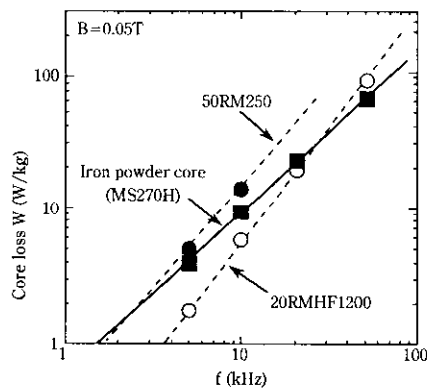


Fig. 7 Core losses of the iron powder core and electrical steels

に、開発材を用いて作製した圧粉磁芯の鉄損の調査結果も合わせて調査する。

4.2.1 実験方法

開発した KIP MG270H と、比較材として無方向性電磁鋼板（川崎製鉄製電磁鋼板 50RM250（0.5mm 厚，JIS 規格材）および 20RMHF1200（0.2mm 厚，高周波対応材）の鉄損を測定した。

KIP MG270H をエポキシ樹脂 2mass% と混合し，686 MPa で外径 38 mm，内径 25 mm，高さ 6.2 mm のリング形状に成形した後，180°C で 30 min 樹脂を加熱硬化させて圧粉磁芯とした。また，無方向性電磁鋼板は，放電加工により，外径 30 mm，内径 20 mm のリング形状の試験片とした。鉄損測定は，電力測定器（日本ヒューレット・パッカード（株）製 E5060A）によって，最大磁束密度 0.05T，周波数 1 kHz～100 kHz の条件で行った。

4.2.2 結果

Fig. 7 に，各試料の鉄損の周波数依存性を示す。KIP MG270H の鉄損は，2.5 kHz 以上では 50RM250 より低く，さらに 25 kHz 以上で 20RMHF1200 の鉄損よりも低くなる。このことより，KIP MG270H を用いた厚粉磁芯は，電磁鋼板とフェライト焼結材がそれぞれ通常使用される周波数帯の間隙にあたる 1～数百 kHz の周波数域での応用が期待される。

5 結 言

ノイズフィルタ用還元鉄粉の初透磁率の支配要因を解析し，得られた知見をもとにノイズフィルタ用高透磁率還元鉄粉 KIP MG270H を開発した。

- (1) O, C, P, S 濃度を低くすることによって，あるいは，粉体の見かけ密度を高くすることによって，圧粉密度が増大し，圧粉磁芯の初透磁率の改善が，率の改善が粒径の微細化の抑制によって圧粉磁芯の初透磁率の改善が可能である。
- (2) 圧粉磁芯中の歪が小さく，結晶粒径の大きい圧粉磁芯ほど初透磁率が高い。
- (3) 結晶粒界に，磁壁の幅と同程度の大きさの介在物が析出していることを確認した。これは，結晶粒界が有効なピンニングサイトとして作用することを示唆するものであり，結晶粒径の微細化の抑制によって圧粉磁芯の初透磁率の改善が可能である。

KIP MG270H を用いて作製した圧粉磁芯の鉄損は，電磁鋼板とフェライト焼結材がそれぞれ通常使用される周波数帯の間隙にあたる 1～数百 kHz の周波数域で低く，この領域での新たな応用が期待される。

参 考 文 献

- 1) K. Fukui, I. Watanabe, and M. Morita: *IEEE Trans. Magn.*, **MAG-8**(1972), 682
- 2) 福井 清，大島照雄，渡辺 迪：東芝レビュー，**28**(1973), 238
- 3) 西田卓彦，菊池 勁，佐藤 駿，市山 正：日本金属学会誌，**42**(1978)6, 593
- 4) 西田卓彦，溝口庄三，山宮昌夫，橋爪利夫，中村 泰：日本金属学会誌，**42**(1978)6, 600
- 5) C. H. Sellers, T. A. Hyde, and D. E. Gay: *Proc. 1996 World Congr. Powder Metallurgy and Particulate Materials*, (1996), 20-99
- 6) F. Ollendorf: *Arch. Elektrotechn.*, **25**(1931), 436
- 7) 高城重彰：「鉄系圧粉および焼結磁心材料の磁気特性解析と製造に関する研究」，東北大学，(1987), 14, 博士論文
- 8) 高城重彰，清田禎公：粉体および粉末冶金，**32**(1985)7, 259
- 9) 尾崎山紀子，小倉邦明，川口雅弘：粉体粉末冶金協会講演概要集，(1998), 92
- 10) W. Hall: *Proc. Phys. Soc.*, **A62**(1949), 741; *J. Inst. Met.*, **75**(1950), 1127
- 11) J. L. Snoek: "New Developments in Ferromagnetic Materials", (1949), § 17, 54, [Elsevier, Amsterdam]
- 12) 近角聰信：「強磁性体の物理（下）（第3版）」，(1987), 174, [裳華房]
- 13) L. Neel: *J. Phys. Rad.*, **9**(1948), 184